

舞鶴工業高等専門学校 学生員○樋口涼士
 舞鶴工業高等専門学校 廣田陽平
 舞鶴工業高等専門学校 増井志帆
 舞鶴工業高等専門学校 大橋一弘
 舞鶴工業高等専門学校 正会員 三輪 浩

1. まえがき ダム下流河川では、ダムによる土砂移動の不連続が河床低下やアーマーコート化を引き起こし、河道の固定化につながるなどの例がある。これらの対策の一つとして、細砂の供給が考えられる。粗礫層に細砂が含まれると粗礫の移動限界が低下することは知られているが、定量的な評価は必ずしも行われていない。足立ら¹⁾は粗礫からなる骨格構造の間隙に細砂が存在する状況を想定して、細砂含有割合が小さい条件の下で粗礫の移動限界に及ぼす細砂の効果を検討した。本研究は、粗礫と細砂の攪拌が進んだ状況を想定し、細砂含有割合がより大きい条件での粗礫の移動限界について検討している。

2. 実験の概要 実験は長さ18m、幅0.5m、深さ0.5mの可変勾配直線水路を用いて行った。この水路の中心線上に長さ0.92m、幅0.3m、深さ0.08mの移動床部となる箱を設置し、その両側および上下流側にほぼ様な粗礫をニスで貼り付けた固定床部を設けた。実験に用いた砂礫は、平均粒径 $d_m=0.71\text{cm}$ の粗礫A、 $d_m=1.43\text{cm}$ の粗礫Bおよび $d_m=0.14\text{cm}$ の細砂である。移動床部には粗礫のみ、または粗礫に細砂を含有させた混合砂礫を充填した（図-1）。なお、本研究では混合砂礫層における細砂の含有率を次式で定義している。

$$f_s = \frac{V_s}{V_g + V_s}$$

ここに、 V_g は粗礫の体積、 V_s は細砂の体積である。

図-2は粗礫Bを粗礫とする混合砂礫の粒度分布である。典型的な二峰性となっている。Carling & Reader²⁾は、 f_s が0.2を超えると粗礫の骨格構造は緩くなり始め、0.4を超えると細砂基質内に粗礫が存在する混合状態置き換わることを示している。したがって、アーマーコート層への細砂の供給は f_s が0.2以下の状態を想定していることになる。図-3は実験前の河床の状況を示したものであり、本研究では $f_s=0.4, 0.6$ および0.8の混合砂礫を対象として粗礫の限界掃流力の測定を行った。

実験は、まず所定の勾配に水路を設定し、レーザー変位計で河床面を測定した。ついで、移動床部分を金網で被い、所定の流量を通水して等流状態を確認した後、網を取り除き、最初の30秒間とそれに続く150秒間に移動床部から固定床部に移動した粗礫の個数を計数した。通水中には超音波変位計で水面を測定し、二度の粗礫移動個数の計数後に再度河床面を測定した。なお、30秒間の計数後に一旦停水するが、河床の再整形は行っていない。表-1に実験条件を示す。表中、 Q は流量、 I は河床勾配を表す。

3. 実験結果と考察 図-4は粗礫Bを用いた実験における水深と30秒間の粗礫の移動個数の関係を、細砂の含有率 f_s ごとに片対数

紙上に描点したものである（比較のために、 f_s が小さい結果¹⁾も記載した）。図中の直線は最小二乗法による実験結果の近似線である。いずれの f_s に対しても概ね直線で近似することができ、本実験の範囲では、水深

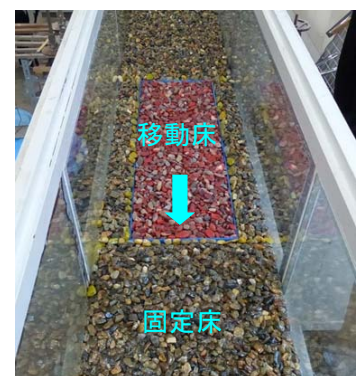


図-1 実験河床

(1)

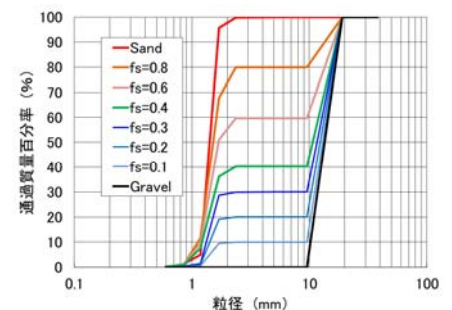


図-2 使用砂礫の粒度分布(粗礫 B)

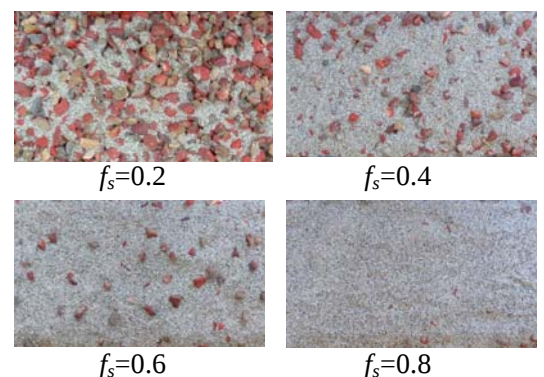


図-3 実験前の河床状況

の増加に対して粗礫の移動個数が指数関数的に増加することを示している。同図より、 $f_s=0.3$ までは同一の水深であっても f_s が増加すると粗礫の移動個数は増加することがわかる。これは、細砂の存在による摩擦角の減少(減摩効果³⁾)が f_s に依存することを示している。しかし、 $f_s=0.4$ 以上では f_s と移動個数の相関は明確でなく、減摩効果の f_s への依存性を認めることはできない。また、 $f_s=0.3$ までは近似直線の傾きは同程度であり、水深の増加に対する粗礫の移動個数の増加速度は f_s に依らずほぼ一定である。しかし、 $f_s=0.4$ 以上では f_s の増加に伴って直線の傾きは増加しており、その結果、低水深では粗礫の移動個数が f_s の増加に伴って減少している。以上のことから、 $f_s=0.4$ 程度を境に粗礫の移動機構は異なると考えられ、粗礫の移動に及ぼす河床の基盤構造について詳細に調べる必要がある。なお、河床から離脱後は突出効果³⁾が作用すると考えられる。

粗礫の限界掃流力の算定は、まず、粗礫のみに対する移動限界水深を岩垣の方法によって算出し、その水深に該当する粗礫の移動個数を近似式から求める。図-4に示

した粗礫Bに対しては、30秒測定、150秒測定のいずれも9個となった。この移動個数を移動限界の閾値として、細砂を含む場合の移動限界水深をそれぞれの近似式から求め、限界摩擦速度と無次元限界掃流力を算出した。図-5は粗礫A、粗礫Bに対する無次元限界掃流力 τ_{*c} と細砂含有率 f_s の関係を示したものである。両粗礫とも f_s の増加に伴って τ_{*c} は漸減するが、 $f_s=0.4$ を越えると τ_{*c} は漸増することがわかる。この傾向は、測定時間による相違はほとんどないが、粗礫径が大きいほど顕著であるといえる。図中にはEgiazaroff式による粗礫の移動限界と粗礫径・平均粒径比 d_g/d_m が示されているが、Egiazaroff式と実験値との差は $f_s=0.4$ 程度で最も小さくなっていることがわかる。細砂の含有によって粗礫が移動しやすくなり、アーマールコートの変質が進行して粗礫の骨格構造が緩くなると、さらなる細砂の含有が可能となる。以上のような状態はEgiazaroff式では追跡が困難であると思われる。

4. あとがき 粗礫層に細砂が混入すると、細砂の割合がある一定まではその増加に応じて粗礫の限界掃流力は低下し、これを越えると限界掃流力は上昇することを実験的に示した。そして、その境界は河床の基盤構造が粗礫の骨格ベースから細砂基質への変容と一致すると考えられることを述べた。また、本実験の範囲ではこの傾向は、粗礫と細砂の粒径比が大きくなると顕著になることがわかった。今後は、河床の基盤構造を考慮した合理的なモデルの導入による移動限界の定式化を行う予定である。なお、本研究に関して米国イリノイ大学Gary Parker教授から有益な助言を賜った。また、本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

- 参考文献** 1) 足立ら：粗礫の移動限界に及ぼす細砂含有の影響，第68回土木学会年次学術講演会概要集，2013。
 2) Carling, P.A. and Reader N.A.: Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels, Earth Surface Processes and Landforms, Volume 7, Issue 4, pp.349-365, 1982.
 3) 池田 宏, 伊勢屋ふじこ：粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響，筑波大学水理実験センター報告, No. 9, pp. 43-47, 1985。

表-1 実験条件

Q (L/s)	fs (gravel A)				fs (gravel B)			
	0	0.4	0.6	0.8	0	0.4	0.6	0.8
10								
15	○	○	○					
20	○	○	○	○		○	○	○
25	○				○			
30	○	○	○	○	○	○	○	○
40					○	○	○	
50					○			
I	1/100				1/50			

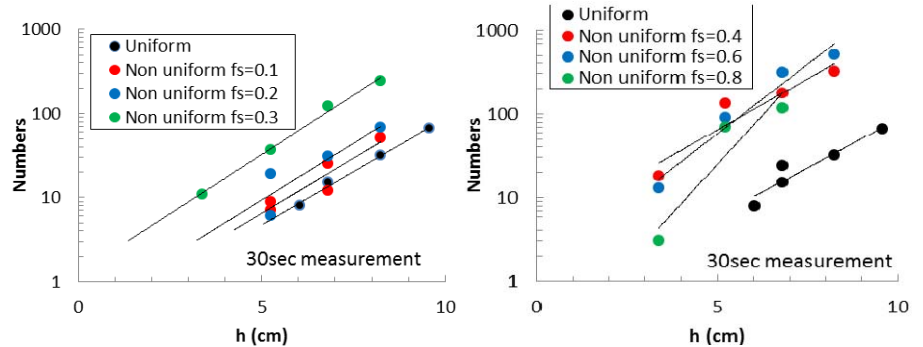


図-4 水深と粗礫の移動個数の関係 (粗礫 B)

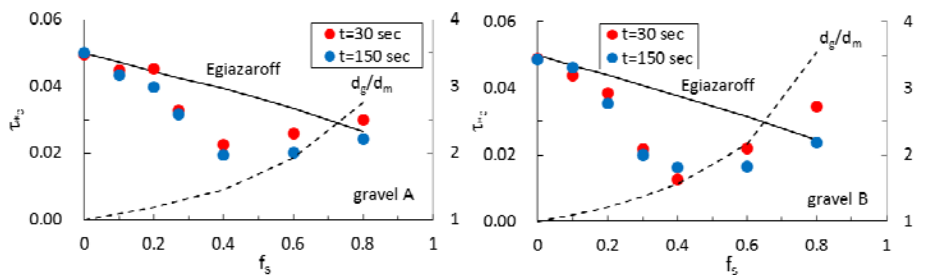


図-5 粗礫の無次元限界掃流力と細砂含有率の関係